

## 멤브레인 LNG선 방열시스템 동적강도 실험적 특성평가

이준환\*, 최우철\*, 김명현\*, 김화수\*\*, 노병재\*\*, 최익홍\*\*, 이제명†\*

부산대학교 조선해양공학과\*  
현대중공업(주)\*\*

Experimental Assessment of Dynamic Strength of Membrane Type  
LNG Carrier Insulation System

Jun Hwan Lee\*, Woo Chul Choi\*, Myung Hyun Kim\*, Wha Soo Kim\*\*, Byeong Jae  
Noh\*\*, Ick Hung Choe\*\* and Jae Myung Lee†\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University\*  
Hyundai Heavy Industries, Co.,Ltd.\*\*

### Abstract

The objective of this paper is to investigate the dynamic strength characteristics of LNG carriers cargo containment system under impact loads experimentally. The material properties were experimentally obtained for individual components of MARK III insulation system. A series of impact tests was performed using a custom-built drop experiment facility as varying heights and weights of the drop object. Crack initiation and propagation were measured during the cyclic dry drop experiment. The quantitative relationship between impact load and crack initiation as well as the cycle number and crack propagation were reported.

※Keywords: LNGC Insulation system(LNG 운반선 방열시스템), Dry drop test(자유낙하시험), Crack(균열), Impact(충격력), Dynamic strength(동적강도)

### 1. 서론

청정에너지로서의 세계적인 수요증대 및 액화천

연가스(Liquefied Natural Gas; 이후 LNG라 칭함) 생산원가의 하락에 힘입은 원유와의 가격경쟁 등으로 인하여 LNG 관련제품의 지속적인 물량증대가 예상되고 있으며, 이러한 이유로 전 세계적으로 조선해양산업계에서는 LNG 관련 제품의 주력 제품화가 이루어지고 있다.

이러한 LNG 시장에서의 국내외 주요현황을 분

접수일: 2006년 12월 6일, 승인일: 2007년 5월 10일

† 교신저자: jaemlee@pusan.ac.kr, 051-510-2342

석하면, LNG 수요증가로 인한 LNG 운반선 수요의 동반증가, LNG 운반선의 대형화 추세 가속, 특허권 보유업체의 시장지배력 가속화, 중국의 LNG 운반선 건조시장 진출에 따른 원가절감 필요성 대두 등이 있으며, 종합적인 분석결과로는 LNG 운반선 수주경쟁 격화에 따른 원가 절감 노력의 가속화가 이루어지고 있으나, 화물창(Cargo containment) 구조, 즉 LNG 방열시스템을 제외하고는 원가절감 한계상태에 이르렀다고 볼 수 있다.

LNG 운반선 관련 기술들 중에서, 화물창 구조의 방열시스템 성능평가는 동적 유체압력이 작용하는 구조물이라는 특성상 각종 동적효과를 고려한 설계, 평가가 이루어져야 한다는 것이 일반적인 견해이다(방창선 등 2004, 노병재 2005, Lee et al. 2006, Wang et al. 2006). 본 연구에서는, 멤브레인형 MARK III LNG 운반선 방열시스템의 동적강도특성을 충격실험을 통하여 정리 분석하여, 화물창 안전성 및 수명평가에 활용할 수 있는 기초자료를 확보하고자 한다(노인식 등 1993a, 1993b, 이제명 등 2005).

## 2. MARK III형 LNG 화물창 방열시스템 주요 구성 재료 성능

Fig. 1에 멤브레인형 MARK III 방열시스템 단면 개요 및 최소유닛을 나타낸다. 최소 유닛이란 실험체 내에 슬릿이나 기하학적 특이부가 존재하지 않고, 두께 방향으로 상부 Plywood, Primary RPUF, Triplex, Secondary RPUF, 하부 Plywood가 균일하게 배치된 구조이다.

매우 복잡한 구조로 이루어져 있음에도 불구하고 이들 각 재료에 대한 실험적 근거자료의 확보가 쉽지 않은 이유로, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타내는 대표적인 구성 재료들의 특성분석을 수행하였다.

### 2.1 STS304L 멤브레인 정·동적 인장 시험

STS304L 멤브레인 판넬은 LNG 화물창의 1차 방벽이자 가수밀 유지 부품이다. 기하학적 주름을

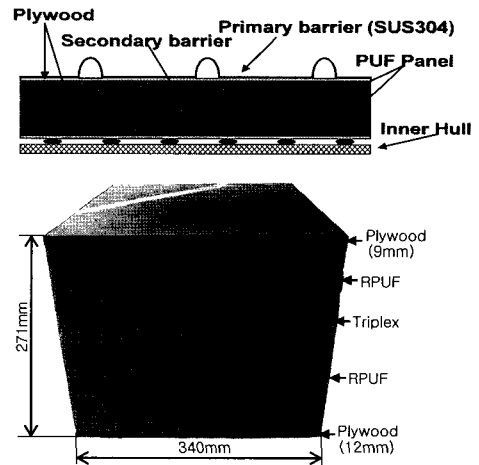


Fig. 1 MARK-III type LNG insulation system structural detail

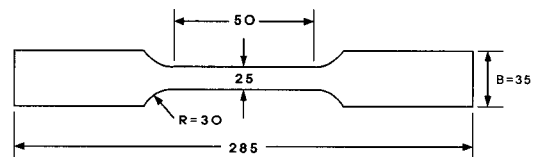


Fig. 2 Tensile test specimen for STS304L

가지는 두께 1.2~2mm의 스테인레스 박판 (STS304L 혹은 SUS304L: JIS)재질이며, 주름부의 신축을 이용하여 LNG 양하역에 의해 발생하는 열변형 등에 대한 완충 및 밀폐를 유지하는 역할을 한다. 멤브레인 재료로서 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강은, 극저온에서도 안정하므로 저온용기 구조용 재료로서 유용하게 사용될 수 있다 (Reed and Tobler 1982, Shimada et al. 1989).

본 연구에서는, STS304L 멤브레인의 정·동적 인장 성능을 평가하기 위하여, MTS 장비를 이용한 시리즈시험을 수행하였다. ASTM 기준을 따라 압연방향(Lengthwise), 대각선방향(Diagonalwise), 압연수직방향(Crosswise)으로 각각 시험편을 제작한 후 시리즈 실험을 수행하였다.

시험편 채취용 재료는 실제 LNG 화물창 방열시

시스템 제작업체인 한국 화이버(주)에서 직접 입수한 STS304L 원판을 이용하였다.

Fig. 2에 ASTM 시험편 규격 및 각 방향별 시험편을 보인다. 방향성에 따른 시리즈 실험의 결과는, 각 방향에 따라 10회씩 실험한 후 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 이용하여 정리하였다.

Fig. 3에 본 연구에서 수행한 정적 인장시험 결과의 대표 예로서 압연방향 결과를 보여주고 있으며, 방향성에 따른 편차는 발견할 수 없었다. 실험 결과를 Table 1에 정리한다.

분석 결과, 초저온용 사용 재료에 대한 KS D3698 규격과 비교해 볼 때 성능상의 무리가 없는 것으로 판명되었다.

STS304L 멤브레인은 극저온 액화천연가스의 1차 밀폐를 위한 구성 부재인 동시에 슬로싱(sloshing)과 같은 동적 유체력을 가장 먼저 받는 부재이며(Arai et al. 2006), 강도평가에 있어 변형을 속도 효과의 고려가 주요 논의사항이 되고 있다. 따라서 변형을 속도에 따른 주요 강도특성변화를 분석하기 위하여 5종류의 변형률 속도를 대상으로 인장 실험을 수행하여 재료강성, 항복응력, 인장응력, 파단변형률을 분석하였으며, Fig. 4에 각 속도별 실험결과를 비교하여 나타내고 있다.

실험결과, 일반적으로 알려져 있듯이 변형률 속도가 높아질수록 재료강성 및 주요강도가 증가하

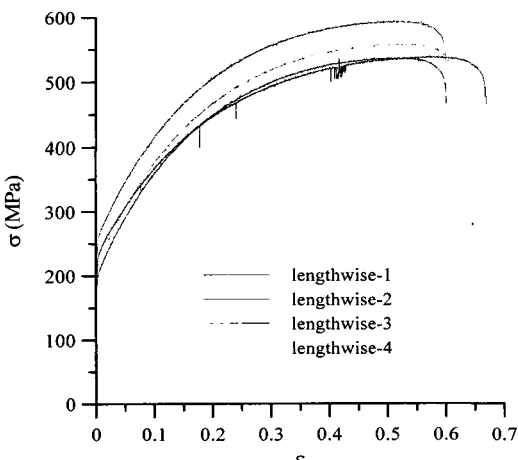


Fig. 3 Stress-strain curve for STS304L obtained by standard tensile coupon test

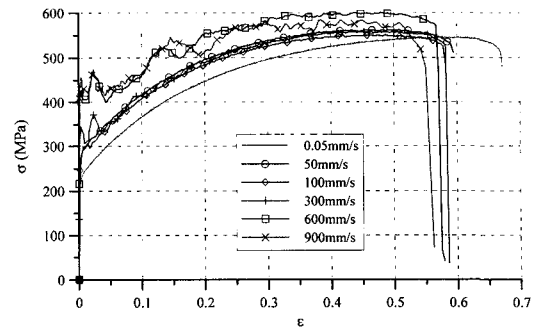


Fig. 4 Stress-strain curve for SUS304L specimen obtained by the present tensile coupon test

Table 1 Mechanical properties of STS304L

	Cross wise	Diagonal wise	Length wise	KS D3698
$\sigma_T$ (MPa)	588.75	598.53	615.88	$\geq 520$
$\sigma_Y$ (MPa)	249.00	257.75	275.66	$\geq 205$
$\epsilon_f$	0.63	0.63	0.63	$\geq 0.40$
$E$ (GPa)	201.57	203.31	203.36	-

Table 2 Strain-rate dependent mechanical properties of STS304L

	Strain Rate ( $s^{-1}$ )	$E$ (GPa)	0.2% $\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_T$ (MPa)	$\sigma_{Td} / \sigma_y$ (0.2%)
0.05mm/s	0.001	-	218.58	547.71	1
50mm/s	1	196.67	265.67	555.33	1.21
100mm/s	2	213.33	265.33	539.90	1.21
300mm/s	6	273.33	327.66	564.28	1.50
600mm/s	12	420	414	594.58	1.89
900mm/s	18	446.67	407.67	587.46	1.87

고 있음이 확인되었다. 뚜렷한 항복응력과 강성을 측정하기가 쉽지 않았으므로 0.2% 오프셋(Offset) 항복응력 및 재료강성을 측정하였고, 결과를 Table 1에 정리하고 있다. 실험을 통해 얻어진 대

표적인 변형률속도별 기계적 특성치를 Table 2에 정리한다.

**2.2 Plywood 정적 인장시험**

MARK III형 LNG 화물창 방열시스템에서 멤브레인과 접합되는 상부 Plywood는 두께 9mm이며, 선각과의 접합을 위해 Mastic과 연결되는 하부 Plywood는 두께 12mm이다. 두 종류 모두 적층 합판구조이며, 재료의 기본적인 구성은 각 층간의 각도가 0°와 90°인 직교 이방성을 가진 여러 겹의 층간구조이다. 각 층간에 결합은 페놀성분의 접착제로 견고하게 고정되어 있으며, 유럽규격(EN322, EN 324, EN310 등)에서 제시하고 있는 여러 실험의 조건을 만족시켜야 한다.

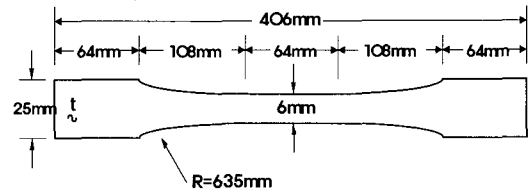
본 절에서는 LNG 방열시스템용 Plywood 제작사인 (주)화인텍에서 직접 입수한 Plywood 원판을 이용하여 표준시험편을 제작하였으며 각 방향에 따른 인장강도를 분석하였다.

적층형 목재의 성능평가에 대한 표준 시험규격 ASTM(D3500-90:2003)을 따라 시험편을 제작하였다. 이 규격에 따르면, 구조용 합판이나 일반 합판 등에서 합판의 층간각도가 0° 혹은 90°로 이루어진 경우, 두께가 6mm 초과 시에는 Type A, 이하인 경우는 Type B를 시편으로 채택하도록 되어 있다. 본 연구에서는 Type A 시험편을 제작하였으며, 두께와 폭 등의 오차범위는 ±0.3% 이내였다. Fig. 5에 Type A 규격 및 해당 시험편의 형상을 나타내며, Fig. 6은 9mm 두께 시험편에서 얻어진 길이 방향과 직각방향의 시험편에 대한 실험 결과의 예를 나타낸다.

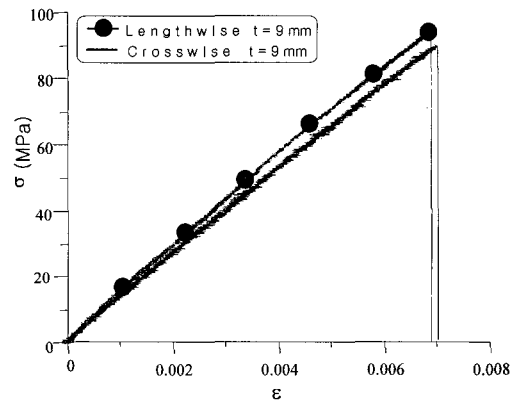
길이방향(Lengthwise)은 최 외곽 적층판의 섬유배치 방향이며, 직각방향(Crosswise)은 길이방향과 반대방향을 의미한다. 기계적 특성에 대한 거시적인 분석 결과, 선형 탄성 구간의 지속 이후에 탄소성 거동 없이 파단에 이르는 전형적인 취성 재료 특성을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 특별하게 이방성 효과를 고려해야 할 만큼 하중 방향별 차이는 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. Table 3에 실제의 사용재료 성능과 선급 규정 비교결과를 나타낸다.

**Table 3** Comparison of experimental results and reference data for plywood

		9 mm thickness		12 mm thickness	
		Exp.	DNV	Exp.	DNV
Young's Modulus (MPa)	Lengthwise	11,530	8,888.6	8,047	8,888.6
	Crosswise	11,115	7,487	7,354	7,487
Ultimate Tensile Strength (MPa)	Lengthwise	84.2	39.9	62.1	39.9
	Crosswise	76.5	N/A	57.3	N/A
Fracture elongation	Lengthwise	0.007	N/A	0.0079	N/A
	Crosswise	0.007	N/A	0.0081	N/A



**Fig. 5** Experiment specimen requirement of Plywood specified by ASTM D3500-90(2003)



**Fig. 6** Sample of uni-axial stress versus strain curves of plywood (t=9 mm)

**2.3 RFUF 기계적 특성 평가**

LNG 화물창용 방열시스템에 적용되는 RPUF는 GTT에서 제시하는 표준 시험법을 이용하여 성능을 확인하여야 한다. 극저온 환경용 재료이므로

특수한 시험 장비를 필요로 하며, 따라서 제작업체를 포함한 국내 몇 군데만 장비를 보유하고 있다. 본 절에서 정리하는 결과들은 (주)한국화이버에서 자체 실험을 통해 확보한 결과들임을 밝혀둔다.

**2.3.1 RPUF 인장강도 시험**

RPUF 관련한 특허권 보유기관인 GTT에서 제시하고 있는 표준인장 시험 방법을 아래에 정리한다.

- 20분 이상 상온과 -170℃ 환경 유지.
- 시험 속도: 5mm/min
- 상온 시험 회수:
  - 유리섬유 방향별(x-y 평면 각) 15회 시험
  - 유리섬유 적층별 6회 시험
- 저온(-170℃) 시험 개수:
  - 유리섬유 방향별(x-y 평면 각) 15회 시험
  - 유리섬유 적층별 6회 시험

Fig. 7에 상기의 시험방법에 따라 수행된 상온 인장시험결과를 나타내며 Fig. 8에 표준 인장시험편을 나타낸다.

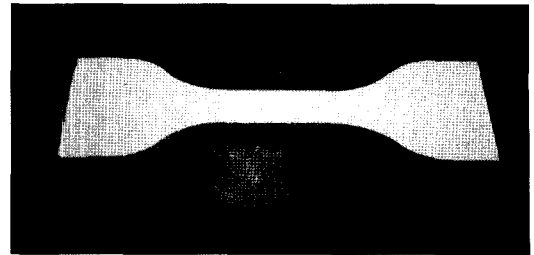


Fig. 8 Standard tensile coupon specimen

**2.3.2 RPUF 압축 강도 시험**

인장시험과 동일하게 GTT에서 제시하고 있는 표준 압축시험편을 이용하여 시험을 수행해야 한다. 표준 시험편 치수는 50×50×50(mm) 정방형 시험체이며, 이하에 시험조건 및 최소 시험편 개

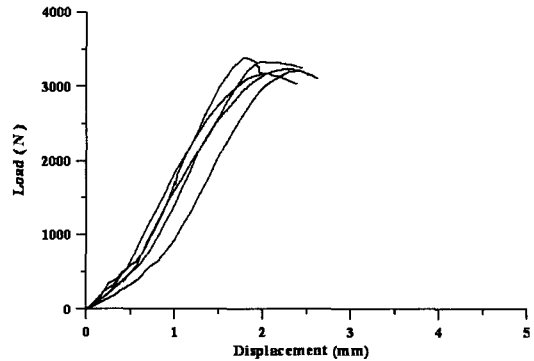


Fig. 9 Standard compression test results

수 등을 정리한다.

- 20분 이상 상온과 -170℃ 환경 유지.
- 시험 속도: 5mm/min
- 상온시험 회수: 15회
- 저온(-170℃)시험 회수: 10회

인장과 압축 외에 펀치시험을 이용한 전단 성능 평가 및 접착력 평가용 시험 등도 있으나 본 연구에서는 주요 성능지표인 인장 및 압축에 대하여 정리한다. Fig. 9에 상기의 시험방법에 따라 수행된 상온 압축시험결과를 나타낸다.

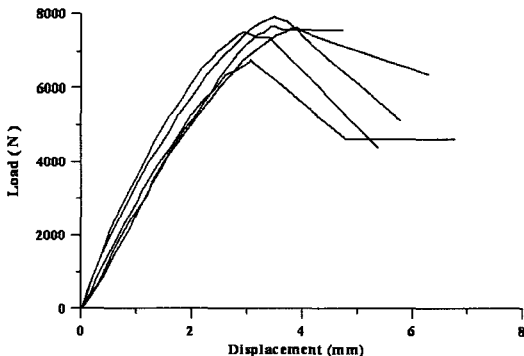


Fig. 7 Standard tensile test results

**3. 방열시스템 정·동적 붕괴 강도**

본 장에서는 전체 방열시스템, 즉 2장에서 개별적으로 분석된 재료들로 이루어진 전체 시스템에 대한 특성의 정·동적 붕괴강도특성의 실험결과를 정리하였다. 시험체 제작에 있어, STS304L 멤브레인 판넬은 방열시스템의 구조강도에 대한 기여

가 크지 않으므로 전체 시험체에서 제거시켰음을 밝혀둔다.

시험체 대부분은 고밀도 Polyurethane 속에 유리섬유(Glass fiber)를 첨가하여 강성을 강화시킨 대표적인 복합재료 RPUF(Cotgreave and Shortall 1977)로 구성되어 있다(Fig. 1 참조).

RPUF는 열 차폐성이 우수하고 입방체상태(Bulk 상태)에서 강성이 우수하기 때문에 다양한 종류의 단열재로 널리 사용된다. 또한 극저온 상태에서의 기계적 특성이 상온보다 우수하기 때문에 극저온 환경에서의 사용에 가장 적합한 재료라고 볼 수 있다. 하지만 RPUF의 기계적 성능에 관한 실험적 분석결과와 공표 사례는 흔하지 않으며, RPUF로 구성된 방열시스템의 구조 성능 평가에 있어 기초자료의 부족현상이 자주 거론되고 있다.

따라서 본 연구에서는, 먼저 정적 압축 붕괴 실험을 수행하여 방열시스템의 압축 하중 하의 붕괴 거동에 관한 기본 정보를 파악한 후, 자유낙하 실험 장비를 이용하여 반복적인 충격하중 하에서의 파손, 변형 등의 관찰을 통한 동적 응답 거동의 정량적 특성을 파악하여 RPUF로 구성된 방열시스템의 구조강도 평가를 수행하였다.

방열시스템에 작용하는 위험하중은 슬로싱 하중으로 대변되는 유체 충격압력이며, 동적 충격압력 하에서의 구조적 건전성을 파악할 필요가 있으므로, 본 연구에서는 압축하중을 주요 고려대상으로 하되, 정적 및 동적 조건을 모두 고려한 실험을 수행하였다.

### 3.1 정적 압축 붕괴 실험

정적 압축 붕괴 실험에 사용하는 시험체는 MARK III 방열시스템의 최소 유닛이다(Fig. 1 참조). 압축붕괴 강도를 평가하기 위한 하중은 Servo-controlled hydraulic experiment machine 200ton Actuator를 사용하여 제어하였으며, MTS 시스템과 결합된 TDS 303 Data logger를 이용하여 계측하였다.

방열시스템이 화물창에 설치되는 경우는 반드시 Mastic의 배치를 갖게 되며, 실제 현장에서의 Mastic 배치는 여러 종류가 있으나, 본 실험에서

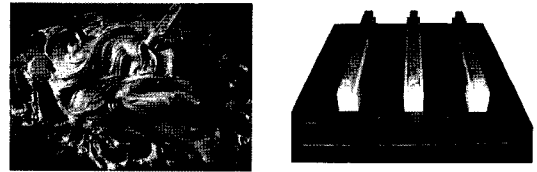


Fig. 10 Mastic fabrication and lower jig with 3 mastics for the collapse experiment

는 현장사용 조건 중 비교적 보수적인 조건인 Mastic 배치간격 80mm, Mastic 폭 20mm를 설정하여 실험을 수행하였다.

Mastic 제작 과정 일부 및 압력센서 부착용 Mastic 지그 배치를 Fig. 10에 나타낸다.

Fig. 11에 획득한 실험결과를 나타내며, Fig. 12에 대표적인 변형형상을 나타낸다. 실험체 하부의 Mastic 지지부를 중심으로 Plywood에서의 균열을 포함한 균열발생이 관찰되었다. 이하에 Fig 11의 각 구간별 특성을 정리한다.

㉠ 구간(탄성영역) : 하중을 가하면 RPUF의 입자들이 압착되면서 압축이 진행된다.

㉡ 구간 : PUF 부분의 압축 정도는 느려지고, 2 하부 Plywood가 전단 및 압축하중에 의해 박리가 발생하면서 하중 값의 변화가 심하게 된다. 그러나 전체 거동을 보면 하중 증가는 매우 완만하다.

㉢ 구간 : 하부 Plywood의 파손 정도가 심해지고 Mastic이 위치하는 부분 바로 위의 RPUF의 파손 정도가 심해지면서 하중은 전체적으로 증가하며, 점진적으로 강체거동을 나타내기 시작한다.

실험을 통하여 파악된 방열 재료의 정적 붕괴 임계강도는 약 123 kN이며 압력으로 환산할 경우 약 12bar에 상당함을 알 수 있었다.

Mastic 배치 조건, 배치 개수 및 치수 등에 따라 편차가 존재하겠으나, 본 실험은 비교적 보수적인 경우를 대상으로 하였으므로 설계 목적상 참고로 활용할 수 있는 MARK III 형 방열시스템의 정적 붕괴강도는 12bar 수준임을 추정할 수 있다.

### 3.2 자유 낙하 충격 실험

LNG 화물창 방열시스템은 슬로싱 충격압력을

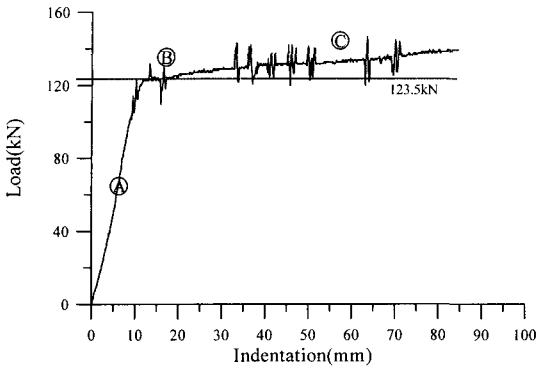


Fig. 11 Experimental result under static compressive loading with 3 mastics

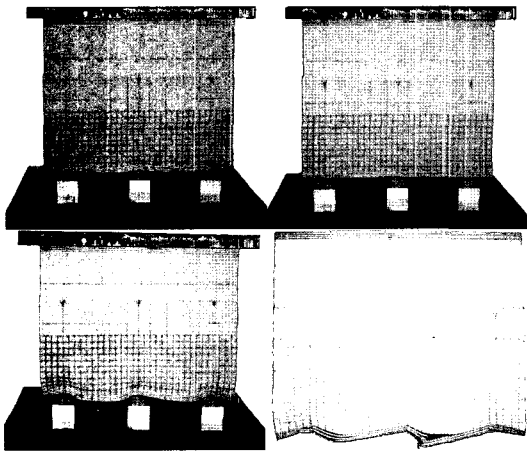


Fig. 12 Deformed shape and failure mode of insulation system

견디는 구조체 역할을 수행해야 한다. 따라서 충격 성능평가가 필수적이다. 본 충격실험에 사용된 장비는 보편적인 충격실험 설비인 낙하 충격시험 장비이며, 방열시스템 충격성능평가에 적합하도록 구성하였다.

Fig. 13에 나타내는 자유낙하 실험 장치를 기본으로, 본 연구에서는 충격하중 작용면에서의 압축 변위와 수직 가속도, Mastic 하부에서의 반력이 계측되었으며, 이들의 계측을 위하여 가속도 센서, 충격력 센서, 고속카메라가 이용되었다.

실험에 사용된 충격체의 무게는 133kgf, 212kgf

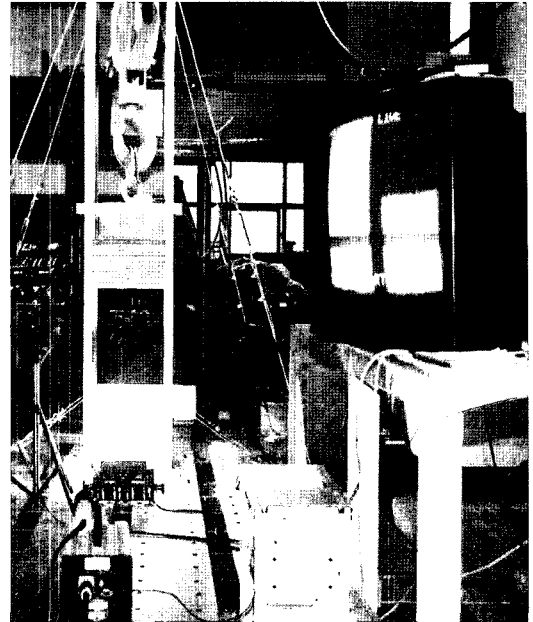


Fig. 13 Custom-built dry drop impact test facility

이며, 충격속도를 조절하기 위하여 높이를 0~1m 범위에서 조절하였다. 강판 적층 결합구조로 만들어진 자유 낙하형 강체를 이용하여, 실험체 상면에 평면으로 등분포 형태의 충격을 가하였다.

충격에 따른 방열시스템 하부에서의 반력변화는 PCB Piezotronics의 Force Sensor(200C50)를 이용하여 계측하였다. 시리즈 실험에 의한 계측결과를 Table 4에 정리하였다.

각각 설정된 하중 수준별로 반복 실험을 통해 반복 충격하중에 의해 발생하는 균열 특성 등을 분석하였다. Fig. 15 와 Fig. 16 에 실험 결과 중의 대표 예로서 얻어진 반력 및 가속도의 시간이력을 나타낸다.

고속카메라를 이용한 변형 이력 분석 결과 (Fig. 14 참조)를 이용하여 정량적 하중 지속 시간을 계측하였으며 동일한 하중 수준에서의 반복계측을 통한 반복횟수별 반력과 가속도의 평균치를 얻을 수 있었다.

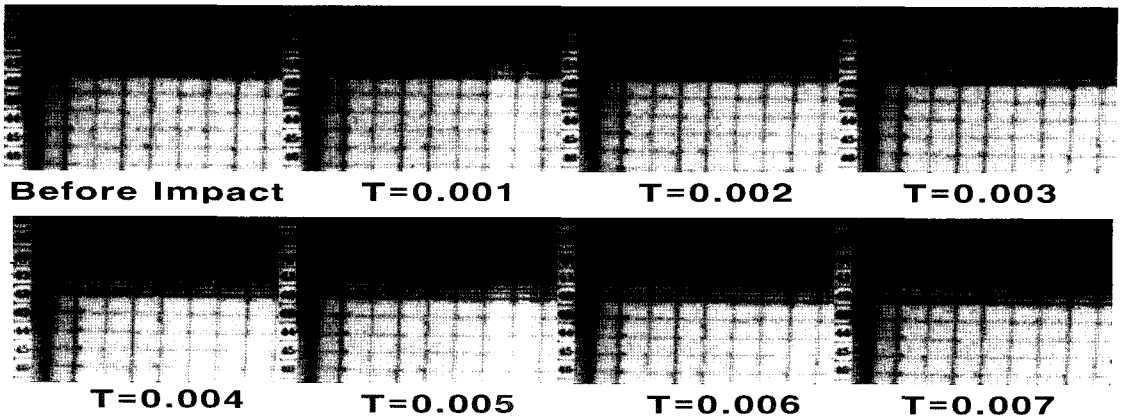


Fig. 14 Sample of measured results(Time duration)

Table 4 Results of weight drop experiment

Mastic (EA)	Drop weight (kgf)	Drop height (m)	Average Force (kN)	Time duration (ms)	No. of drops for fracture initiation / total drop numbers
2(EA)	133	0.1	2.75	6.68	13 / 40
		0.2	6.46	6.80	4 / 7
		0.4	7.03	9.03	2 / 5
	212.2	0.1	9.57	9.91	7 / 10
		0.2	12.32	13.05	2 / 8
3(EA)	133	0.2	1.79	2.34	28 / 30
		0.4	2.13	4.66	13 / 15
		0.6	2.14	5.62	2 / 4
	212.2	0.05	0.97	2.29	4 / 20
		0.2	2.16	7.73	2 / 5
		0.4	2.29	7.77	2 / 5

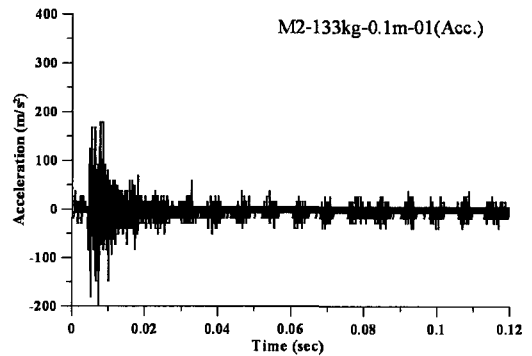


Fig. 16 Time history of acceleration

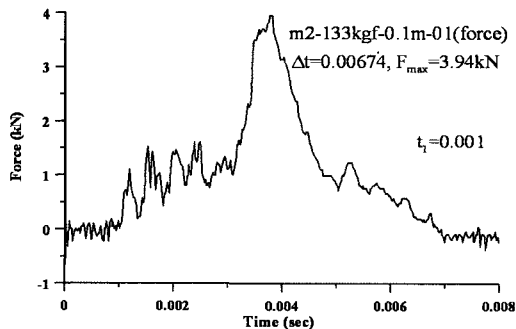


Fig. 15 Time history of reaction force

#### 4. 결론 및 향후 연구내용

본 연구에서는, 멤브레인형 LNG 운반선 방열시스템 동적강도 특성 분석을 위한 방열시스템 구성 재료별 실험 및 충격시험을 수행하였다.

- Plywood, RPUF, STS304 membrane 등 LNG 화물창 방열시스템 주요 구성부재에 대한 재료시험을 수행하고 관련 자료를 조사 분석하여 MARK III 형 화물창에 대한 기본 물성치 특성을 분석하였으며, 선급에서 규정하는 최소 강도 기준에 만족하는 것을 확인하였다.
- 방열시스템에 대하여, 정적 붕괴실험 및 Dry drop 시험기법을 이용한 충격시험을 수행하였으며 충격하중 하에서의 방열시스템 동적거동 특성에 대한 분석을 수행하였다.



- 재질의 이방성 문제에 대해서는 뚜렷한 특성을 파악할 수 없었으나, 충격하중 하에서의 RPUF 변형문제에 대해서는 점성 효과가 매우 크다는 것을 확인하였으며, 점성효과에 관련된 상세 결과는 향후 이어질 발표에 소개할 예정이다.

후 기

본 연구는 현대중공업(주) 및 한국과학재단 우수연구센터(ASERC) 지원과제 일부로 수행된 것으로, 위 기관들의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 노병재, 2005, "LNG운반선 구형 화물창 슬로싱 해석," 대한조선학회 특별논문집, pp. 22-30.
- 노인식, 남용윤, 이호섭, 1993a, "독립구형 LNG탱크의 구조 안전성 평가(제1보) 피로균열 발생수명 예측," 대한조선학회 논문집, 제 30권, 제 2호, pp. 132-140.
- 노인식, 남용윤, 이호섭, 1993b, "독립구형 LNG탱크의 구조 안전성 평가(제2보) LBF 이론에 의한 피로균열 진전해석," 대한조선학회 논문집, 제 30권, 제 4호, pp. 74-82.
- 방창선, 하문근, 이충남, 배준홍, 강운태, 구명준, 2004, "LNG 화물창의 Drop Test," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 101-106.
- 이제명, 김화수, 노병재, 박진석, 백정기, 윤종원, 김명현, 정장영, 채용희, 최익흥, 2005, "LNG 운반선 방열시스템의 동적강도특성에 관한연구," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 444.
- Arai, M., Makiyama, H.S., Cheng, L.Y., Kumano, A., Ando, T. and Imakita, A., 2006, "Numerical Analysis of 3-D Sloshing in Tanks of Membrane-Type LNG Carriers," Design, Construction and Operation of Natural gas Carriers and Offshore System, pp. 179-187.
- Cotgreave, T. and Shortall, J.B., 1977, "The Fracture Toughness of Reinforced Polyurethane Foam," Chemistry and Materials Science and

- Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 722-730.
- Lee, J.M., Kim, M.H., Paik, J.K., Kim, W.S., Noh, B.J., and Choe, I.H., 2006, "Dynamic Strength Characteristics Of Membrane Type LNG Cargo Containment System," ICSOT 2006, pp. 189-200.
- Reed, R.P., and Tobler, R.L., 1982, "Deformation of Metastable Austenitic Steels at Low Temperatures," Advances in Cryogenic Engineering - Materials, Vol. 28, pp. 49-56.
- Shimada, M., Tobler, R.L., Shoji, T. and Takahashi, H., 1989, "Size, Side-Grooving, and Fatigue Precracking Effects on J - integral Test Results for sus 304 Stainless Steel at 4K," Advances in Cryogenic Engineering - Materials, Vol. 34, pp. 259-266.
- Wang, B., Kim, J.W. and Shin, Y., 2006, "Strength Assessment of Membrane-Type Lng Containment System", Design, Construction and Operation of Natural gas Carriers and Offshore System, pp. 179-187.



< 이 준 환 > < 최 우 철 > < 김 명 현 >



< 김 화 수 > < 노 병 재 > < 최 익 흥 >



< 이 제 명 >